

doi:10.13756/j.gtxyj.2020.02.014

无线通信技术

大规模 MIMO 系统中低复杂度信号检测算法

任茜源, 郑兴林

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 第五代(5G)移动通信系统大规模多输入多输出(MIMO)技术利用信道硬化理论,采用消息传递检测(MPD)算法实现了良好的检测性能。但是由于 MPD 算法的计算复杂度随调制阶数和用户天线数的增加而增加,在实际的大规模 MIMO 系统中难以有效实现。概率近似—消息传递检测(PA-MPD)算法可以减少原始 MPD 算法的计算复杂度。文章将提前终止迭代过程和更新部分符号概率的策略应用于 MPD 算法迭代过程中,提出了一种选择性更新—消息传递检测(SU-MPD)算法,从而降低了 MPD 算法的计算复杂度。仿真结果表明,在各种天线配置下 SU-MPD 算法的计算复杂度最大限度可降低为 MPD 算法的 19% 和 PA-MPD 算法的 50%,且不降低算法的检测性能。

关键词: 大规模多输入多输出; 低复杂度; 消息传递检测; 概率近似消息传递

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2020)02-0067-06

Low Complexity Signal Detection Algorithms for Massive MIMO Systems

REN Xi-yuan, ZHENG Xing-lin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts
and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) has been identified as a key technology for the upcoming Fifth Generation (5G) wireless communication systems. The original Message Passing Detection (MPD) algorithm utilizes channel hardening theory to achieve good detection performance in large-scale MIMO systems. However, the computational complexity of the MPD algorithm increases with the increase of the modulation order and the number of user antennas, which is difficult to implement effectively in an actual large-scale MIMO system. The Probabilistic Approximation-MPD (PA-MPD) algorithm can reduce the computational complexity of the original MPD algorithm. In this paper, the iterative process of terminating the iterative process and updating the partial symbol probability is applied in the iterative process of the MPD algorithm, a Selective Update-MPD (SU-MPD) algorithm is proposed, which reduces the computational complexity of the MPD algorithm. The simulation results show that the computational complexity of SU-MPD algorithm can be reduced to 19% of MPD algorithm and 50% of PA-MPD algorithm under various antenna configurations, without reducing the detection performance of the algorithm.

Key words: massive MIMO; low-complexity; MPD; PA-MPD

0 引 言

大规模多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术由于其高频谱利用率成为第五代(5G)移动通信系统中的关键技术^[1]。在上行链路中,最优最大似然(Maximum Likelihood, ML)检测算法^[2]的计算复杂度随着用户天线数和调制阶数的增加呈指数增长,难以在大规模 MIMO 系统中实现;传统的线性检测算法因涉及高维矩阵运算,其计算复杂度较高^[3]。近年来,研究者提出了一些次优的非线性检测算法,其中,基于因子图的置信度传播(Belief Propagation, BP)算法^[4]有较低的计算复杂度,但因子图的全连接结构导致 BP 算法存在环路效应^[5-6];文献[7]提出了近似消息传递(Approximate Message Passing, AMP)算法,其传

递过程只需传递均值和方差,从而降低了计算复杂度;在 AMP 算法的基础上,文献[8]利用信道硬化现象提出了消息传递检测(Message Passing Detection, MPD)算法;文献[9]基于 MPD 算法选择部分符号概率计算每次迭代过程中传递的消息,从而得到低复杂度的概率近似—消息传递检测(Probability Approximation-MPD, PA-MDP)算法^[9-10]。但 MPD 和 PA-MPD 算法的复杂度也会随天线数及调制阶数的增加而增大,同样难以运用于高阶调制系统^[11]。

本文在 MPD 算法基础上,利用更新部分符号概率的策略,提出了一种选择性更新—消息传递检测(Selective Update-MPD, SU-MPD)算法。仿真结果表明,与 MPD 和 PA-MPD 算法相比,改进算法在保证检测性能的同时,可有效降低计算复杂度。

收稿日期:2019-07-18

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2018ZX03001026-002)

作者简介:任茜源(1995—),女,四川达州人。硕士,主要研究方向为移动通信。

通信作者:任茜源,硕士。E-mail:nsnb9495aly@foxmail.com

大规模 MIMO 系统模型及信道硬化特性

1.1 系统模型

在多用户的大规模 MIMO 系统中,设有 K 个单天线用户,基站端具有 $N(N > K)$ 根接收天线。系统模型为

$$\tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}}, \quad (1)$$

式中: $\tilde{\mathbf{y}} = [\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_N]^T \in \mathbf{C}^{N \times K}$ 为接收信号; $\tilde{\mathbf{H}} \in \mathbf{C}^{N \times K}$ 为信道增益矩阵,其中子信道增益是独立同分布的; $\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_K]^T \in \mathbf{C}^{K \times 1}$ 为 K 个单天线用户的发送信号,每个元素 $\tilde{x}_i$ 采用正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM); $\tilde{\mathbf{n}} \in \mathbf{C}^{N \times 1}$ 为 $N \times 1$ 维加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN),且 $\tilde{n}_i \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2)$, CN 为噪声服从均值为零、方差为 σ_n^2 的高斯分布。式 (1) 的复数域模型可转化为对应的实数域模型, $\mathbf{H} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\tilde{\mathbf{H}}) & -\mathbf{I}(\tilde{\mathbf{H}}) \\ \mathbf{I}(\tilde{\mathbf{H}}) & \mathbf{R}(\tilde{\mathbf{H}}) \end{bmatrix}$, $\mathbf{y} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\tilde{\mathbf{y}}) \\ \mathbf{I}(\tilde{\mathbf{y}}) \end{bmatrix}$, $\mathbf{x} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\tilde{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{I}(\tilde{\mathbf{x}}) \end{bmatrix}$, $\mathbf{n} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\tilde{\mathbf{n}}) \\ \mathbf{I}(\tilde{\mathbf{n}}) \end{bmatrix}$, 式中: $\mathbf{R}(\cdot)$ 和 $\mathbf{I}(\cdot)$ 分别为实部和虚部; $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{2N \times 2K}$, $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{2N}$, $\mathbf{n} \in \mathbf{R}^{2N}$ 和 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{2K}$ 。因此,复数域星座点集合 A 对应 $N \times K$ 的复数域 MIMO 系统,实数域星座点集合 B 对应 $2N \times 2K$ 的实数域 MIMO 系统。

1.2 信道硬化特性

信道硬化指 MIMO 信道的互信息方差相对于其均值增长非常缓慢或随着天线数量的增加而缩小的现象^[12]。信道硬化特性给大规模 MIMO 系统的信号处理带来很多优势。其中,随着信道尺寸的增加, $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ 矩阵非对角线元素的值与主对角线元素的值相比变得越来越小。MPD 检测算法利用该特性实现大规模 MIMO 系统的低复杂度和高性能信号检测。

2 MPD 算法

2.1 MPD 算法

MPD 算法^[8]分为消息传递和 $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ 估计。将式 (1) 两端同乘 $\mathbf{H}^T$ 后改写为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{J}\mathbf{x} + \mathbf{v}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Z} \triangleq \frac{\mathbf{H}^T \mathbf{y}}{N}$; $\mathbf{J} \triangleq \frac{\mathbf{H}^T \mathbf{H}}{N}$; $\mathbf{v} \triangleq \frac{\mathbf{H}^T \mathbf{n}}{N}$ 。 $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{Z}$ 可通过信道估计得到。令 $g_i \triangleq \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij} x_j + v_i$ 为干扰和

噪声,假设 g_i 是均值为 μ_i 、方差为 σ_i^2 的高斯分布,由中心极限定理可知,随着 N 和 K 的增加高斯近似将会更加准确^[13-14]。

均值 μ_i 和方差 σ_i^2 可由式 (3) 和 (4) 计算得到:

$$\mu_i = E(g_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij} E(x_j) = \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij} \sum_{s \in B} s p_j(s), \quad (3)$$

$$\sigma_i^2 = \text{Var}(g_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij}^2 \text{Var}(x_j) + \sigma_v^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij}^2 \left(\sum_{s \in B} s^2 p_j(s) - E(x_j)^2 \right) + \sigma_v^2, \quad (4)$$

式中: $E(\cdot)$ 为期望; s 为发送信号的星座点集合符号; $\text{Var}(\cdot)$ 为方差; $\sigma_v^2 = \sigma_n^2 / (2N)$ 。由于高斯近似,符号 x_i 的后验概率 $p_i = P_r(x_i | \mathbf{z}_i, \mathbf{J}) \propto \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2}(\mathbf{z}_i - \mathbf{J}_{ii}x_i - \mu_i)^2\right)$, 式中: P_r 为先验概率; $\mathbf{z}_i$ 为 $\mathbf{Z}$ 的第 i 个向量,从而可以得到符号 x_i 的对数似然比 $L_j = \{(L_j(s_1), L_j(s_2), \dots, L_j(s_k))\}$ 为

$$L_j = \ln \frac{p_j(s_k)}{p_j(s_1)} = \frac{(2(\mathbf{z}_j - \mu_j) - \mathbf{J}_{jj}(s_k + s_1))(\mathbf{J}_{jj}(s_k - s_1))}{2\sigma_j^2}, \quad (5)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, \sqrt{M}$, M 为星座点集合中星座点的个数。利用符号的概率值,可根据星座点集合中最大符号概率 $p_j(s_k)$ 判断发送符号 s_k 。

在 MPD 算法的信道估计中,假设 $\mathbf{X}_p = \mathbf{P}\mathbf{I}_{2K}$ 是幅度为 P 的导频矩阵, $\mathbf{I}_{2K}$ 为单位矩阵,接收端收到的导频信号为

$$\mathbf{Y}_p = \mathbf{H}\mathbf{X}_p + \mathbf{W}_p = \mathbf{P}\mathbf{H} + \mathbf{W}_p, \quad (6)$$

式中: $P = \sqrt{KG}$, G 为符号平均能量; $\mathbf{W}_p$ 为噪声矩阵。

2.2 PA-MPD 检测算法

文献[9]提出的 PA-MPD 算法选择部分符号概率计算每次迭代过程中传递的消息,减少了计算消息传递的均值与方差所需符号概率的数量,即利用部分符号概率获得 $E(x_j)$ 和 $\text{Var}(x_j)$ 的估计值,符号概率值的大小作为选择符号概率的准则。从第 2 次迭代开始,PA-MPD 算法选择最大的 l 个符号概率来计算 $E(x_j)$ 和 $\text{Var}(x_j)$ 。由于剩余 $\sqrt{M} - l$ 个符号概率的影响可以忽略不计,从而获得的均值和方差的估计非常接近实际值。当 n 值选取合适时,PA-MPD 算法的性能损失可忽略不计。文献[9]给出了 16QAM、64QAM 及 256QAM 的最佳 l 值分别为 2、2 和 4。

3 改进的 MPD 算法

在 MPD 算法中,每次算法迭代时需要利用 $\sqrt{M}$ 个符号概率来计算式(3)和(4)中的均值和方差,这存在大量的乘法和加法运算。此外,随着用户数和调制阶数的增加,将会带来更大的计算开销。通过观察 MPD 和 PA-MPD 算法每次迭代后 x_i ($\forall i \in 2K$) 的符号概率值发现,当最大符号概率值大于某一阈值后,其对应的 x_i 不会随着迭代次数的增加而发生改变,并且随着迭代次数的增加, x_i 的一些小符号概率值会越来越小。所以省略一些对最后判决结果影响较小的符号概率更新可降低算法的计算复杂度。在 MPD 和 PA-MPD 算法的基础上,我们提出利用判断最大符号概率值,选择提前终止迭代过程或符号概率更新数的 SU-MPD 算法,在保证算法检测性能的前提下可有效降低算法计算复杂度。

SU-MPD 算法的迭代过程如下:(1) 在第 1 次迭代时,更新所有星座点对应符号的概率,其消息传递过程与 MPD 算法相同。(2) 从第 2 次迭代开始,对所有符号概率进行排序。如 16QAM 调制方式,实数域发送符号星座点集合 S 为 $\left\{-\frac{3}{\sqrt{10}}, -\frac{1}{\sqrt{10}}, \frac{1}{\sqrt{10}}, \frac{3}{\sqrt{10}}\right\}$, 对应的符号概率分别为 $\{p_{s_1}, p_{s_2}, p_{s_3}, p_{s_4}\}$, 对该符号概率集合进行排序。当最大的符号概率值大于阈值 T 时终止迭代过程;当最大的符号概率值小于 T 时根据最大的符号概率值选取计算消息传递的均值和方差所需的更新符号数。不同调制方式下,根据最大符号概率值选取不同的更新点数 Q 。上述迭代过程直到满足最大的符号概率大于阈值 T 或迭代次数达到最大迭代次数时终止。

迭代过程结束后,根据星座点集合中最大符号概率 $p_j(s_k)$ 判断发送符号 s_k 。

综合上述算法,得到 SU-MPD 算法如下:

Input: $\mathbf{J}, \mathbf{Z}, \sigma_v^2, \Delta$

Output: $\mathbf{L}$

1: Initialize: $p_i(s_k) = \frac{1}{\sqrt{M}}, i=1, \dots, 2K, k=1, 2, \dots,$

$\sqrt{M}, T$

2: for $t=1$ do

3: for $i=1$ to $2K$ do

4: $\mu_i \leftarrow \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij} (2p_j - 1)$

5: $\sigma_i^2 \leftarrow \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} 4J_{ij}^2 p_j (1 - p_j) + \sigma_v^2$

6: $L_i \leftarrow \frac{2J_{ii}}{\sigma_i^2} (z_i - \mu_i)$

7: $\tilde{p}_i \leftarrow \frac{e^{L_i}}{1 + e^{L_i}}$

8: $p_i \leftarrow (1 - \Delta)\tilde{p}_i + \Delta\tilde{p}_i$

9: $A_i = \text{sort}(p_i)$

10: end

11: end

12: for $t=2$ to number_of_iterations do

13: for $i=1$ to $2K$ do

14: $M \leftarrow$ according to the range of values of $\max(p_i)$

15: $\mu_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij} \sum_{p_j^{t-1}(s) \in A_j(1, \dots, M)} s p_j^{t-1}(s)$

16: $\sigma_i^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^{2K} J_{ij}^2 \left(\sum_{p_j^{t-1}(s) \in A_j(1, \dots, M)} s p_j^{t-1}(s) - E(x_i)^2 \right) + \sigma_v^2$

17: $L_i \leftarrow \frac{2J_{ii}}{\sigma_i^2} (z_i - \mu_i)$

18: $\tilde{p}_i \leftarrow \frac{e^{L_i}}{1 + e^{L_i}}$

19: $p_i \leftarrow (1 - \Delta)\tilde{p}_i + \Delta\tilde{p}_i$

20: $A_i = \text{sort}(p_i)$

21: end

22: end

其中, Δ 为衰减因子; t 为迭代过程提前终止的阈值,当最大的符号概率值 $> t$ 时,终止算法的迭代过程。

4 性能与复杂度分析

4.1 仿真性能分析

本小节中,我们将在不同天线配置和调制方式下,通过大量仿真选取 SU-MPD 算法终止迭代的符号概率阈值 T 。当 $T=1$ 时, SU-MPD 与 PA-MPD 算法的消息迭代更新过程相同,具有最大的计算复杂度。SU-MPD 算法的计算复杂度随 T 的减小而减小,但同时 SU-MPD 算法的性能也存在一定的损失。因此,在不影响 SU-MPD 算法检测性能的情况下,折衷选取最优符号概率阈值 $T=0.9$,可有效降低算法的计算复杂度。不同调制方式下的更新符号数为 Q 。

在对比分析改进的 SU-MPD 算法与 PA-MPD 和 MPD 算法的误码率(Bit Error Ratios, BER)性能时, SU-MPD 算法与 MPD 及 PA-MPD 算法采用

相同的迭代次数,即 16QAM、64QAM 和 256QAM 调制的信号检测算法的迭代次数分别为 7、13 和 13。表 1 为 SU-MPD 算法在 3 种调制方式和不同发送天线数配置下,基于符号概率消息传递所需更新的点数 Q 。16QAM 和 64QAM 调制方式下,根据最大符号概率值选取 1 个或 2 个符号概率更新点数;在 256QAM 的高阶调制方式下,为了保证算法的检测性能,将符号概率更新点数 Q 增加为 2 或 4。

表 1 不同调制方式下符号概率更新数 Q 的取值

调制方式	K	Q
16QAM	8	$\text{Max}(P_i) > 0.90$ 终止迭代
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.90$ $Q = 2$
	16	$\text{Max}(P_i) > 0.90$ 终止迭代
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.90$ $Q = 2$
	32	$\text{Max}(P_i) > 0.90$ $Q = 1$
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.90$ $Q = 2$
64QAM	8	$\text{Max}(P_i) > 0.85$ $Q = 1$
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.85$ $Q = 2$
	16	$\text{Max}(P_i) > 0.90$ $Q = 1$
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.90$ $Q = 2$
	32	$\text{Max}(P_i) > 0.90$ $Q = 1$
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.90$ $Q = 2$
256QAM	8	$\text{Max}(P_i) > 0.90$ 终止迭代
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.90$ $Q = 4$
	16	$\text{Max}(P_i) > 0.85$ $Q = 2$
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.85$ $Q = 4$
	32	$\text{Max}(P_i) > 0.90$ $Q = 2$
		$\text{Max}(P_i) \leq 0.90$ $Q = 4$

图 1 对比了调制方式为 16QAM、单天线用户数 $K=8$ 时,不同接收天线数 N 随着信噪比(Signal

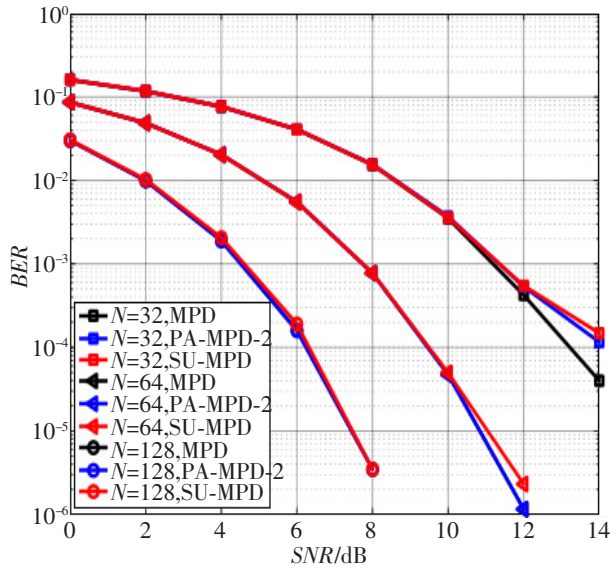


图 1 16QAM 调制方式、 $K=8$ 时, 3 种算法的性能对比

Noise Ratio, SNR)的增加对 3 种算法 BER 性能的影响。由图可知, $N=32$ 和 64 时,与 MPD 和 PA-MPD 算法相比, SU-MPD 算法的检测性能有较小的损失。当 $N=128$ 时, SU-MPD、MPD 和 PA-MPD 算法 BER 曲线几乎完全重合。随着接收天线数的增加, SU-MPD 算法检测性能趋近于 PA-MPD 算法检测性能。不同 N 对应的 SU-MPD 方案计算复杂度将在下一小节分析。

图 2 和 3 所示为大规模 MIMO 系统中接收天线数 $N=128$ 、单天线用户数 $K=8, 16, 32$ 和不同调制方式下 SU-MPD、MPD 和 PA-MPD 算法的检测性能。

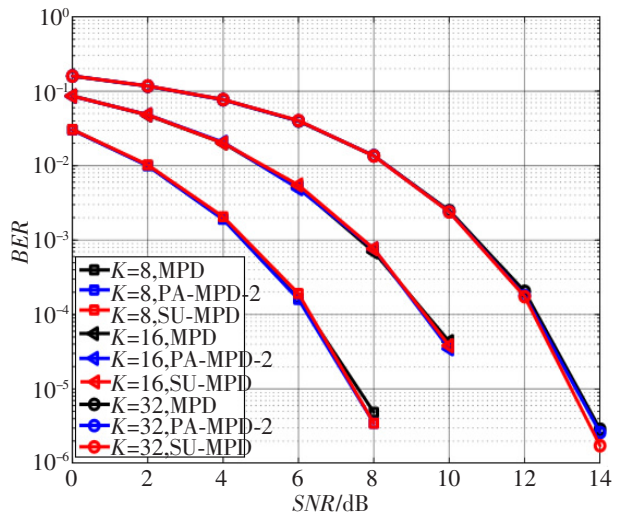


图 2 16QAM 调制方式、 $N=128$ 时, 3 种算法的性能对比

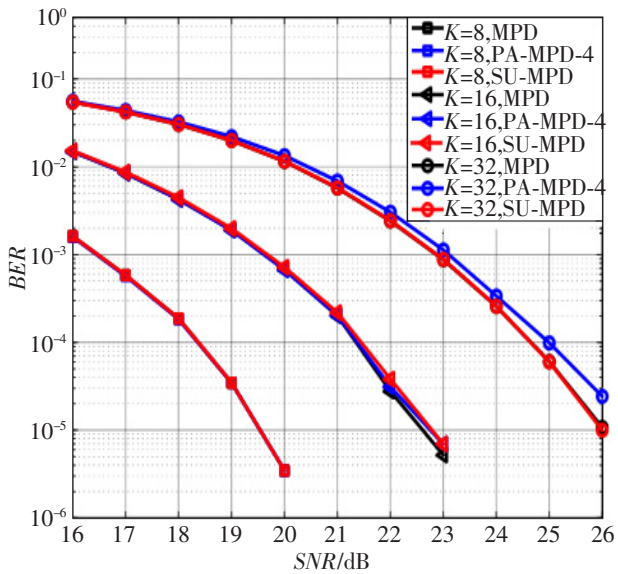


图 3 256QAM 调制方式、 $N=128$ 时, 3 种算法的性能对比

由图 2 和 3 分析可知,两种调制方式下, $K=8$ 和 16 时, SU-MPD 算法的检测性能与 PA-MPD 和 MPD 算法的检测性能趋于一致。当 $K=32$ 时, 与 MPD 算法相比, SU-MPD 算法的检测性能有较小的损失。

调制方式为 16QAM 时(如图 1 所示), 在 $BER=10^{-5}$ 时 SU-MPD 算法的检测性能略低于 MPD 算法, 而与 PA-MPD 算法检测性能一致。调制方式为 16QAM 的 BER 曲线如图 2 所示, 与 MPD 算法相比, 在 $BER=10^{-4}$ 时 SU-MPD 算法的检测性能损失了 0.2 dB, PA-MPD 与 MPD 算法检测性能相当; 由图 3 可知, 在 16QAM 符号概率更新点数的基础上, 可以通过增加更新点数来保证 SU-MPD 算法在 256QAM 调制方式下的检测性能, 且使得 SU-MPD 算法检测性能优于 PA-MPD 算法。由此可知, 在当前终止迭代的符号概率阈值 T 和更新符号概率点数 Q 下, 用户天线数和调制阶数较大时, SU-MPD 算法的检测性能更接近 MPD 算法。

4.2 计算复杂度分析

由于 SU-MPD 算法的计算复杂度随着 SNR 的增大而减小, 因此仿真可通过统计每个 SNR 下 SU-MPD 算法迭代过程中平均更新的概率点数来衡量改进算法的计算复杂度。

图 4 所示为在 16QAM 调制方式和单天线用户 $K=8$ 的配置下, SU-MPD 算法相对于 MPD 和 PA-MPD 算法的计算复杂度比值曲线。由图可知, 当接收天线数 $N=32$ 时, SU-MPD 与 MPD 和 PA-MPD 算法的计算复杂度比值随着 SNR 的增大而趋于定值: 35% 及 65%。且当 N 值增加时, 计算复杂度比

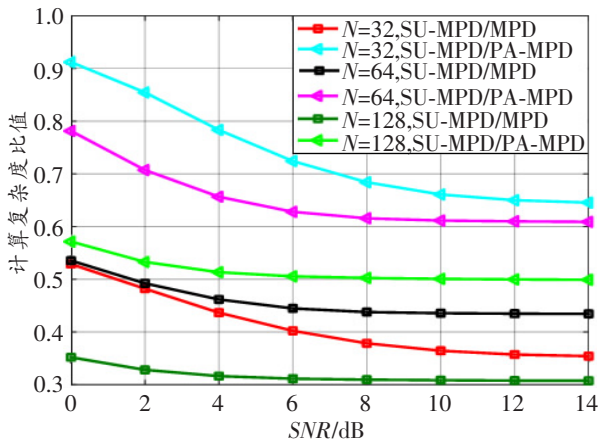


图 4 16QAM 调制方式、 $K=8$ 时, 不同 N 下 SU-MPD 与 MPD 及 PA-MPD 算法复杂度比值

值变小, 这表明通过更新部分符号概率能有效降低计算复杂度。

图 5 和 6 分别表示调制方式为 16QAM 和 256QAM、 $K=8, 16$ 和 32 时, SU-MPD 与 MPD 算法及 SU-MPD 与 PA-MPD 算法计算复杂度的比值曲线。由图可知, K 值较小时改进算法的计算复杂度降低趋势更为明显, 且 SU-MPD 算法计算复杂度最大限度能降低为 MPD 算法计算复杂度的 19%, PA-MPD 算法计算复杂度的 55%。

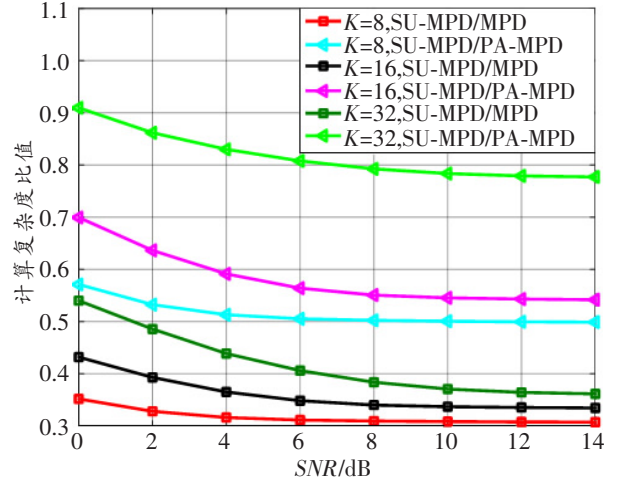


图 5 16QAM 调制方式、 $N=128$ 时, SU-MPD 与 MPD 及 PA-MPD 算法复杂度比值

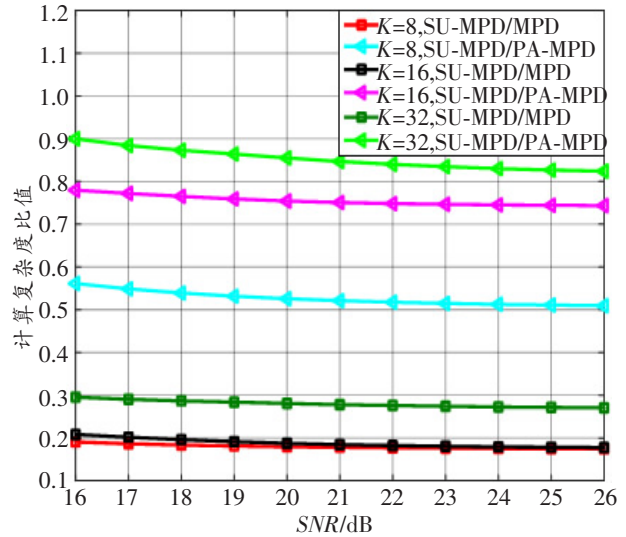


图 6 256QAM 调制方式、 $N=128$ 时, SU-MPD 与 MPD 及 PA-MPD 算法复杂度比值

表 2 所示为在调制方式为 256QAM、 $SNR=26$ 时, SU-MPD、MPD 和 PA-MPD 算法的计算复杂度比较(用加法和乘法运算次数体现)。

表 2 3 种检测算法的加法和乘法运算次数

计算复杂度	加法运算次数	乘法运算次数
MPD ($K = 8$)	102 960	102 544
PA-MPD ($K = 8$)	33 424	33 840
SU-MPD ($K = 8$)	16 087	16 503
MPD ($K = 16$)	425 568	424 736
PA-MPD ($K = 16$)	139 040	139 872
SU-MPD ($K = 16$)	74 861	79 318
MPD ($K = 32$)	1 729 728	1 728 064
PA-MPD ($K = 32$)	566 848	568 512
SU-MPD ($K = 32$)	483 168	481 504

通过上述计算复杂度分析可知,在保证信号检测性能的前提下,改进的 SU-MPD 算法与 PA-MPD 及 MPD 算法相比可以有效地降低计算复杂度,更能适用于大规模 MIMO 高阶调制系统。

5 结束语

本文在 MPD 算法的基础上,基于符号概率引入提前终止迭代过程和更新部分符号概率的策略,提出了 SU-MPD 算法。仿真结果表明,SU-MPD 算法能显著降低计算复杂度,且 SU-MPD 算法的检测性能与 PA-MPD 算法及 MPD 算法性能趋于一致。

参考文献:

[1] Imran K. A Robust Signal Detection Scheme for 5G Massive Multiuser MIMO Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (10): 9597—9604.

[2] Duangsuwan S, Jamjareegulgarn P. Detection of Data Symbol in a Massive MIMO Systems for 5G Wireless Communication[C]//2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON). Pattaya, Thailand: IEEE, 2017: 8075832.

[3] Yang S, Hanzo L. Fifty Years of MIMO Ddetection; The Road to Large-Scale MIMOs[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 1941—1988.

[4] Frey B J. Graphical Models for Machine Learning and Digital Communication[M]. Cambridge: MIT press, 1998.

[5] Som P, Datta T, Chockalingam A, et al. Improved Large-MIMO Detection based on Bamped Belief Propagation[C]//2010 IEEE Information Theory Work-

shop on Information Theory , Cairo, Egypt: IEEE, 2010: 5503188.

[6] Usami T, Nishimura T, Ohgane T, et al. BP-based Detection of Spatially Multiplexed 16-QAM Signals in a Fully Massive MIMO System[C]// 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Kauai, HI, USA: IEEE, 2016:166—170.

[7] Som P, Datta T, Srinidhi N, et al. Low-Complexity Detection in Large-Dimension MIMO-ISI Channels Using Graphical Models [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5 (8): 1497—1511.

[8] Narasimhan T L, Chockalingam A. Channel Hardening-Exploiting Message Passing (CHEMP) Receiver in Large-Scale MIMO Systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8 (5): 847—860.

[9] Zhu H, Lin J, Wang Z. Reduced Complexity Message Passing Detection Algorithm in Large-Scale MIMO Systems[C]//2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WC-SP). Nanjing, China: IEEE, 2017: 8170973.

[10] Zeng J, Lin J, Wang Z. Low Complexity Message Passing Detection Algorithm for Large-Scale MIMO Systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(5): 708—711.

[11] Wu S, Kuang L, Ni Z, et al. Low-Complexity Iterative Detection for Large-Scale Multiuser MIMO-OFDM Systems Using Approximate Message Passing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 902—915.

[12] Hochwald B M, Marzetta T L, Tarokh V. Multiple-Antenna Channel Hardening and Its Implications for Rate Feedback and Scheduling[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(9): 1893—1909.

[13] Liu L, Yuen C, Guan Y L, et al. Convergence Analysis and Assurance for Gaussian Message Passing Iterative Detector in Massive MU-MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 6487—6501.

[14] Goldberger J, Leshem A. MIMO Detection for High-Order QAM based on a Gaussian Tree Approximation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(8): 4973—4982.